

X^e Semaine de la langue française et de la francophonie

**Théâtre des Asphodèles
Lyon, 20 mars 2005**

De la chimie à la physique subatomique : des mots pour les constituants de la matière¹

Maurice R. Kibler²
Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1
Institut de Physique Nucléaire de Lyon
IN2P3-CNRS et Université Claude Bernard Lyon 1
43 Bd du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne Cedex, France

Résumé

Cet article grand public est une invitation à découvrir le monde des particules ou monde subatomique. Le point de départ est 1869, date de publication de la première table de Mendeleïev, et l'arrivée est 2005. L'accent est mis sur les noms des particules qui sont à la base du modèle standard de la physique des particules et de leurs interactions.

¹ Copyright © 2005 M. Kibler

² adresse électronique : m.kibler@ipnl.in2p3.fr

Une certaine poésie se dégage des noms des éléments chimiques de la table périodique dont les premières cases ont été remplies en 1869 suite aux travaux de Dmitri Ivanovitch Mendeleïev et de bien d'autres scientifiques. Il suffit de réfléchir à ce que peuvent évoquer les noms de tantale, niobium, titane, ceux de lutécium, francium, europium, ou encore ceux de neptunium, mercure, hélium, et puis ceux de curium, einsteinium, mendélévium. La table périodique nous entraîne dans un merveilleux voyage à travers la mythologie, les langues anciennes, l'histoire, la géographie, la vie des savants, etc. Existe-il quelque chose de similaire dans le monde des particules ? Mais tout d'abord qu'est-ce que le monde des particules ? Pour répondre à ces questions, il faut en poser une autre : « Qu'est-ce qui s'est passé après Mendeleïev et les autres créateurs de cette table ? »

Il y a deux éléments de réponse : d'une part le développement et l'extension de la table des éléments chimiques et d'autre part une avancée spectaculaire dans la compréhension de la complexité par la découverte de sous structures et de tables périodiques pour les constituants des éléments eux-mêmes. On verra là aussi que la dénomination des constituants intimes de la matière n'est pas dénuée de poésie.

Alors extension de la table de Mendeleïev d'abord. Beaucoup des prédictions de Mendeleïev vont être confirmées par l'expérience. C'est ainsi que l'on va découvrir en 1886 ce que Mendeleïev avait appelé l'eka-silicium (avec le préfixe eka qui vient du sanscrit et qui signifie unité) et que l'on appelle maintenant le germanium³ [l'eka-silicium, donc le germanium, et le silicium appartiennent à une même colonne de la table périodique, donc à une même unité familiale]. La découverte de nouveaux éléments chimiques (donc de nouveaux atomes) va se poursuivre tout au long de la fin du 19^{ème} siècle, durant tout le vingtième siècle et se poursuit encore de nos jours. Si en 1870 on connaissait environ 70 éléments, on en comptait environ 86 en 1940 et on en connaît aujourd'hui 116, dont les derniers sont de moins en moins stables. Il n'ont d'ailleurs pas tous reçu un nom ; le dernier nommé est le roentgenium (du nom de Wilhelm Conrad Roentgen, le découvreur des rayons X).⁴ Là aussi tout augmente ; d'ailleurs il n'y a pas de raison majeure, mis à part les limitations expérimentales, pour que la table périodique ait une fin et la chasse aux nouveaux éléments n'est pas terminée.

Parallèlement à cette quête vers de nouveaux éléments, un pas, même plusieurs pas, vers la complexité vont être franchis. Il faut mentionner la découverte de la

³ Inutile de dire où a été découvert le germanium !

⁴ Cet élément a pour numéro atomique $Z = 111$. Il se trouve dans les derniers éléments de la table (le dernier, en ce début de l'année 2005, a pour numéro $Z = 116$).

structure atomique au début du vingtième siècle qui sera suivie du passage à la physique subatomique (physique nucléaire dans les années 1932 et physique des particules dans les années 1950). À l'heure actuelle la physique subatomique s'intéresse aux constituants élémentaires de la matière et aux forces qui régissent les interactions fondamentales ainsi qu'à l'assemblage des constituants élémentaires en structures complexes.

Du temps de Mendeleïev, les éléments chimiques sont des atomes sans structure particulière. Avec la découverte de l'**électron** par Joseph John Thomson en 1897 et celle du noyau atomique par Ernest Rutherford vers 1911, on va s'acheminer vers un modèle planétaire de l'atome où des électrons décrivent des orbites autour d'un noyau central, le noyau le plus simple étant celui de l'atome d'hydrogène qui est un noyau consistant d'un **proton** (l'élément hydrogène, sous sa forme atomique, est donc constitué d'un proton et d'un électron qui tourne autour du proton). Entre parenthèses, électron et proton viennent du grec, électron voulant dire ambre, car lorsque l'on frotte de l'ambre avec une peau de chat on produit des charges électriques, et proton voulant dire premier (ici première particule par son poids). Avec la découverte du **neutron** par James Chadwick en 1932, on va aller plus loin dans la complexité et voir que le noyau atomique est constitué en fait de protons et de neutrons que l'on appelle collectivement des nucléons (le proton étant chargé positivement – sa charge électrique est l'opposée de celle de l'électron – et le neutron sans charge électrique). Et puis en 1962, on va franchir un nouveau pas avec l'introduction des **quarks** (selon la dénomination de Murray Gell-Mann) ou des **as** (selon celle de George Zweig). Les quarks ou as apparaissent comme les constituants des protons et neutrons. Dans une image simplifiée, chaque nucléon (proton ou neutron) est composé de trois quarks (voir Fig. 1). Les quarks n'ont jamais été observés à l'état libre : ils sont confinés dans les protons et les neutrons et plus généralement dans ce que l'on appelle des hadrons (voir ci-après). Ils étaient probablement libres au moment du « Big Bang » baignant dans une soupe primordiale avec d'autres particules comme des photons et des électrons (voir Fig. 2). Il y a de nombreuses évidences, tant directes qu'indirectes, pour l'existence des quarks.

Figure 1 : de l'atome aux quarks. L'atome est constitué d'un noyau central autour duquel « gravitent » des électrons. Le noyau est constitué de nucléons, c'est-à-dire de protons et de neutrons, et chaque nucléon est constitué de quarks. Les quarks sont 100000 fois « plus petits » que les nucléons, eux mêmes 10 fois « plus petits » que le noyau qui est à son tour 10000 fois « plus petit » que l'atome.

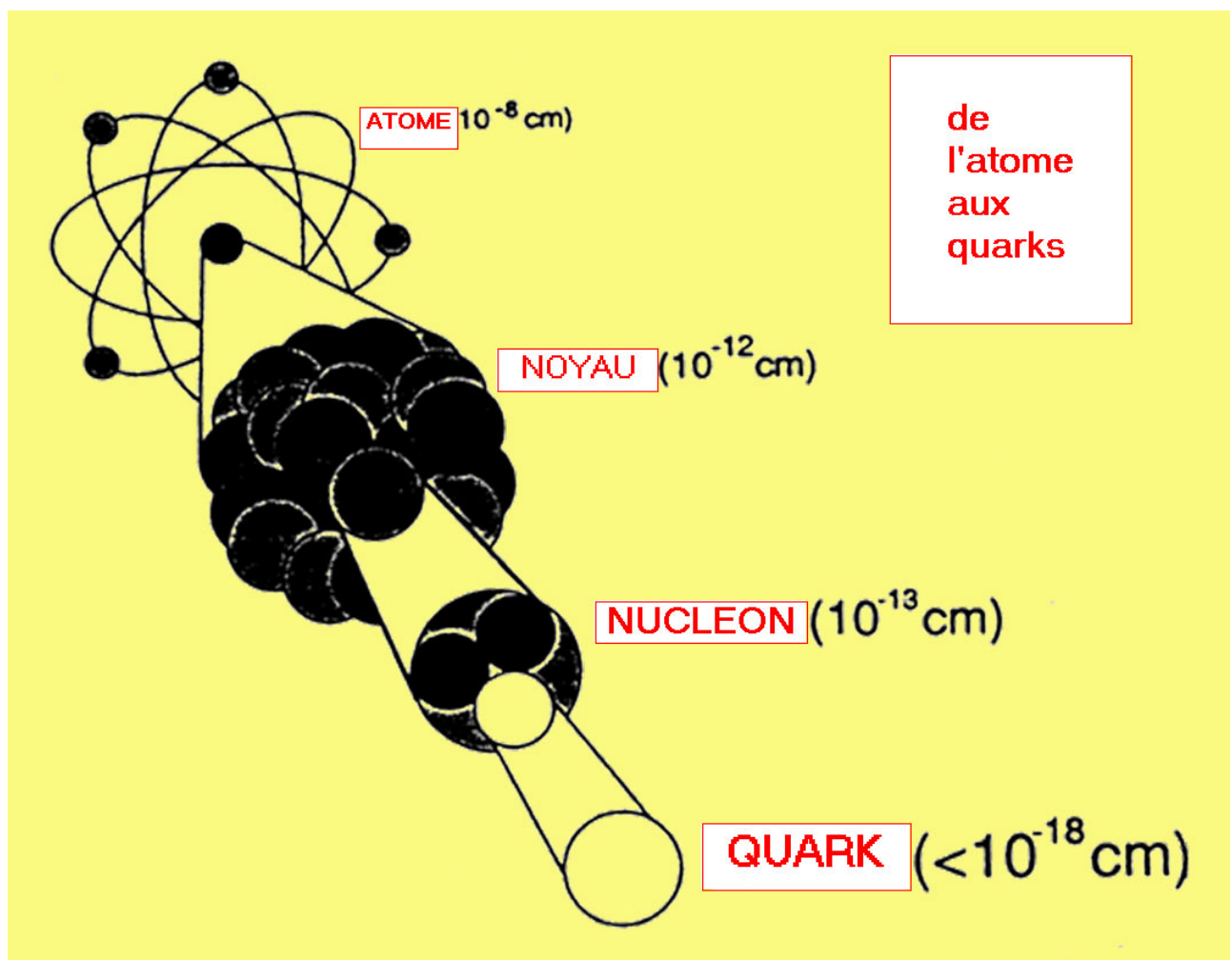
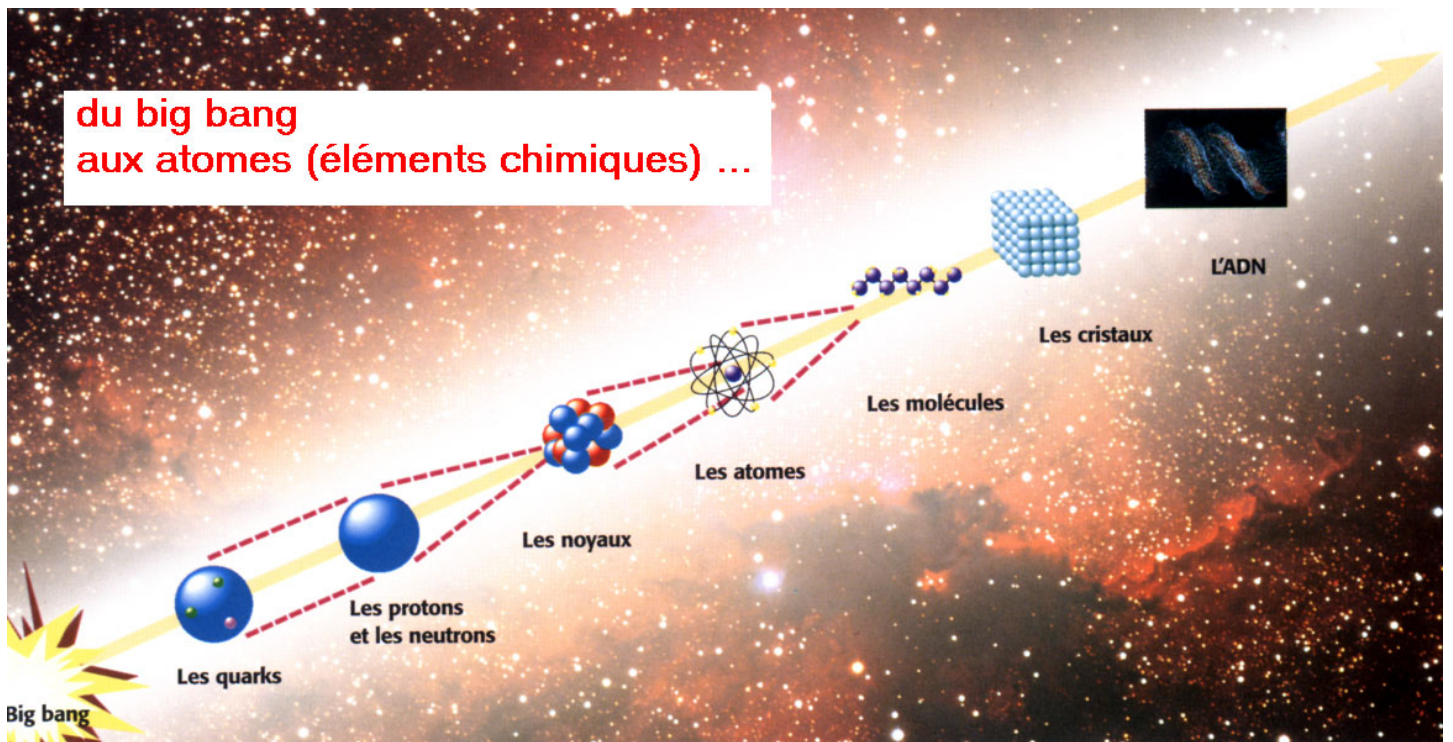


Figure 2 : du Big Bang aux éléments chimiques. Lors des premiers instants de l'univers, des quarks et des gluons (qui serviront à lier les quarks pour en faire des neutrons et des protons) cohabitent dans un plasma de quarks et gluons. On y trouve également des électrons, des photons, etc. Au fur et à mesure que l'univers va se refroidir, les quarks vont s'associer sous forme de protons et de neutrons, qui formeront à leur tour des noyaux autour desquels viendront « orbiter » des électrons. Ce sera la naissance des atomes, puis des molécules et de structures plus complexes (cristaux, ADN, etc.). Et puis, la vie !



À ce stade, il faut remarquer que la dénomination des particules fondamentales (proton, quarks, etc.) se démarque en général des processus utilisés pour dénommer les éléments chimiques. Pour les éléments chimiques, on fait appel à la mythologie, à la géographie, la géologie, aux noms des découvreurs, ... enfin bref à des choses connues du monde passé et présent. Avec l'entrée dans le monde de l'infiniment petit, les découvertes sont de plus en plus collectives (elles se font souvent par des équipes internationales pouvant contenir plus de cinq cent personnes) ce qui explique que les noms de nouvelles particules sont de moins en moins basées sur des noms propres. De plus, les nouvelles particules deviennent de moins en moins « visibles », appartiennent de moins en moins au monde sensible et c'est pour cela que les dénominations sont moins parlantes mais souvent plus poétiques. Quand Gell-Mann avance l'hypothèse des quarks, il ne sait pas comment les nommer mais il se rappelle du roman « Finnegans wake » de James Joyce où il y a « Three quarks for Muster Mark ». Or il se trouve que les particules de Gell-Mann se groupent souvent par trois comme les trois quarks de Joyce. D'où le nom donné par Gell-Mann à ses particules. Quant à Zweig, il les appelle as car rappelons-nous un as c'est un premier (N°1 aux cartes ou aux dés). Il veut donc indiquer que ses particules correspondent à des principes premiers constitutifs de particules plus complexes, les protons et les neutrons.

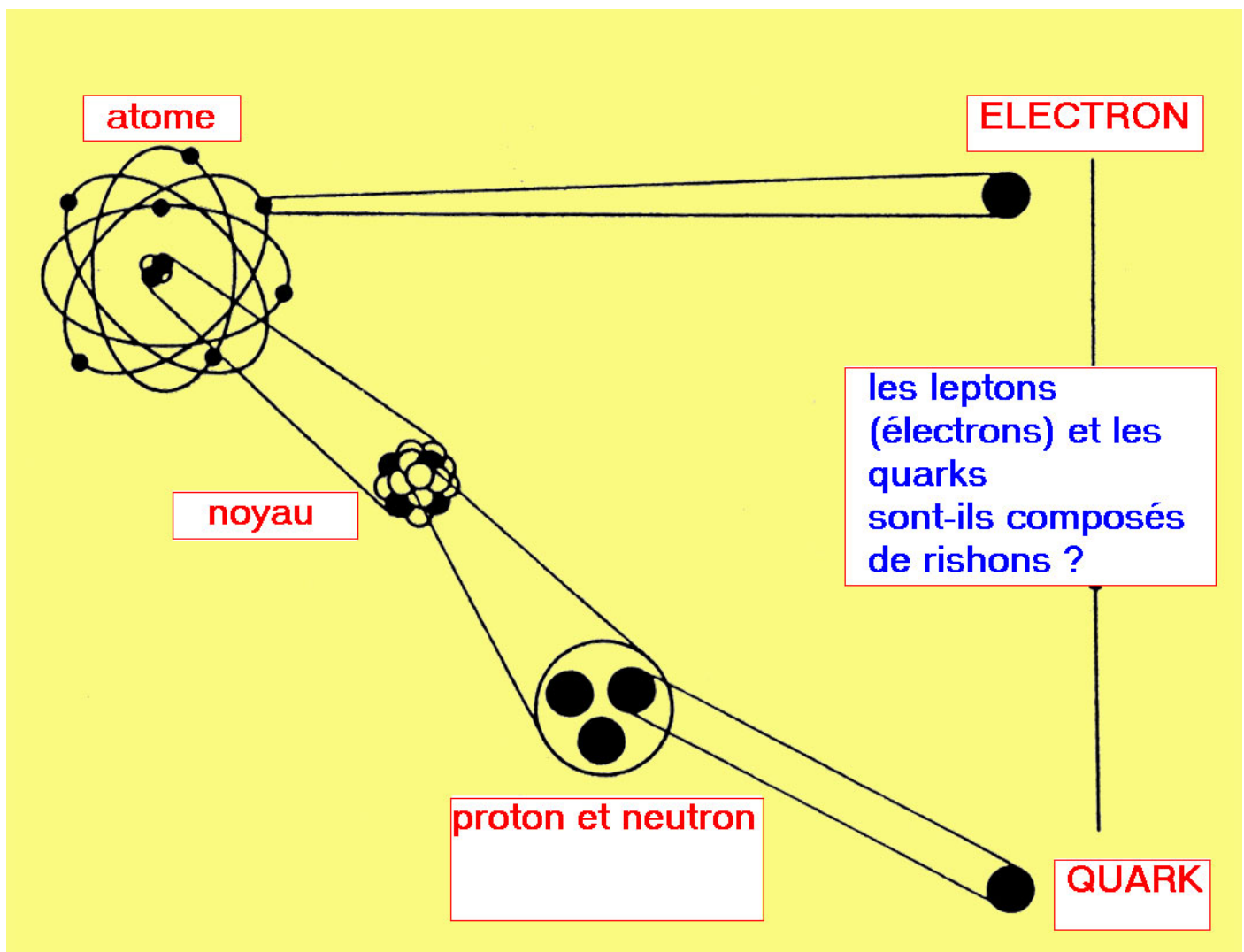
A l'heure actuelle, on connaît six quarks : on dit que l'on a six saveurs ou qualités de quarks, à savoir, le quark « down », le quark « d'étrangeté », le quark « de beauté » ainsi que le quark « up », le quark « de charme » et le quark « de vérité ». Chaque quark peut se trouver dans trois états différents que l'on appelle des états de couleur (soit bleue, soit verte, soit rouge, avec une référence évidente au spectre de la lumière blanche). Les quarks sont tellement loin de notre monde sensible qu'il nous faut leur donner des attributs de saveur ou qualité et de couleur qu'ils n'ont évidemment pas en réalité mais qui correspondent à des états physiques bien déterminés.

Le monde de la matière subatomique comprend deux continents : le continent hadronique (constitués de **hadrons**, encore un mot qui vient du grec et qui signifie fort car les hadrons interagissent entre eux par une interaction que l'on appelle interaction forte) et le continent leptonique (constitués de **leptons**, un autre mot qui vient du grec et qui signifie léger car les leptons sont des particules beaucoup plus légères que les hadrons). Les hadrons contiennent les **baryons** (tiré du grec et qui signifie lourd car les baryons sont des particules lourdes) constitués chacun de trois quarks ainsi que les **mésons** (tiré du grec et qui signifie moyen car les mésons sont des particules moyennement lourdes) constitués chacun d'un quark et d'un antiquark (par antiquark il faut comprendre l'antiparticule associée au quark). Les protons et les neutrons sont des hadrons

particuliers. Les électrons sont des leptons particuliers. Les **neutrinos**,⁵ dont on parle beaucoup aujourd'hui, sont également des leptons. Tout comme il y a 6 quarks, il y a également 6 leptons (3 leptons de type électron et 3 leptons de type neutrino).

Peut-on imaginer un degré de complexité plus fin où par exemple les quarks et les leptons seraient faits de particules plus élémentaires (voir Fig. 3) ? La réponse est oui pour certains chercheurs.

Figure 3 : composition des quarks et électrons. Les électrons (qui sont des leptons particuliers) et les quarks sont-ils eux-mêmes composés de particules encore plus élémentaires ?



⁵ D'abord nommé neutron par Wolfgang Pauli (car il n'a pas de charge électrique), il fut appelé un certain temps ergon par Francis Perrin, qui signifie travail en grec (car c'est la particule qui permet de conserver le travail ou l'énergie dans la radio-activité bêta), puis neutretto (le petit neutre) par Enrico Fermi et enfin neutrino.

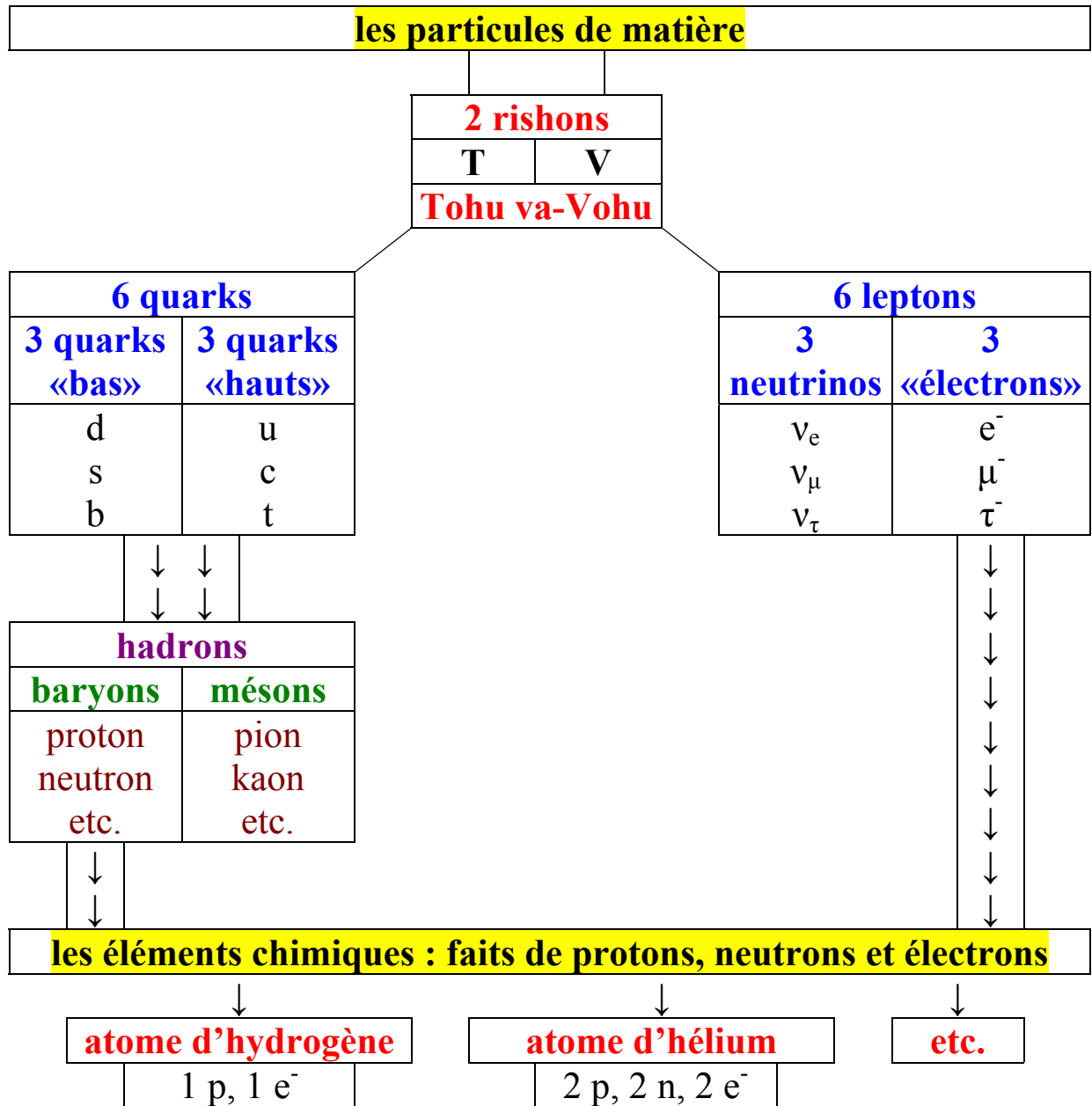
En effet, il existe plusieurs modèles, dits modèles composites, où les quarks (qui engendrent le monde hadronique) et les leptons (qui engendrent le monde leptonique) sont composés de particules encore plus élémentaires. Haim Harari les appellent **rishons** et Michael A. Shupe **quips**. Il faut bien noter que ces modèles introduits dès la fin des années 1970 n'ont reçu aucune confirmation, qu'elle soit directe ou indirecte. Le mot rishon vient de l'hébreu et veut dire « premier » et le mot quip vient de l'anglais et signifie blague, mais quip est aussi une contraction pour « **quark inner part** » (partie interne du quark). Il y a deux rishons ou quips de base. Dans la terminologie des rishons, on les appelle le **tohu** et le **bohu** avec une référence évidente à la Genèse. À partir des ces deux particules et de leur antiparticules, on peut construire les quarks et les leptons c'est-à-dire toute la matière et même les champs que deux particules échangent lorsqu'elles interagissent. On peut parler d'une table périodique à une échelle en dessous de l'échelle subatomique (voir Fig. 4). Le cœur de la figure 4 consiste d'une table périodique contenant les 6 quarks et les 6 leptons. Il y a en fait 3 périodes, appelées familles ou générations, à savoir :

$$(\mathbf{d}, \mathbf{u}, \mathbf{v}_e, \mathbf{e}^-), (\mathbf{s}, \mathbf{c}, \mathbf{v}_\mu, \mathbf{\mu}^-), (\mathbf{b}, \mathbf{t}, \mathbf{v}_\tau, \mathbf{\tau}^-).$$

Dans cette table, les masses des particules croissent de la gauche vers la droite et de haut en bas. Les particules d'une même colonne ont des propriétés similaires, d'où une périodicité d'ordre 4. Les deux dernières générations sont d'une certaine manière des répliques de la première génération. Toute la matière que l'on rencontre sur terre est faite pour l'essentiel de particules appartenant à la première génération. Les deux autres générations interviennent dans des particules que l'on trouve dans les rayons cosmiques ou que l'on produit dans des collisionneurs de particules.⁶

⁶ Sur le plan philosophique, on peut se poser la question : pourquoi cette répétition de générations ?

Figure 4 : table périodique à l'échelle subatomique.



$$p = uud, \quad n = ddu, \quad u = VTT, \quad d = V^*V^*T^*, \quad e^- = T^*T^*T^*$$

Voilà, jusqu'ici nous avons parlé de particules ou de champs de matière. Les particules c'est comme les gens, pour qu'elles interagissent il faut qu'elles échangent quelque chose. Les particules de matière, lorsqu'elles interagissent, le font par l'intermédiaire d'un champ, dit champ de jauge, ou d'une particule appelée boson (le mot **boson** vient du fait que de telles particules répondent à la statistique de Satyendranath Bose et Albert Einstein). Donc à côté des particules de matière, que l'on appelle des fermions (le mot **fermion** vient du fait que de telles particules répondent à la statistique de Enrico Fermi et Paul Adrien Maurice Dirac), il faut donc introduire des bosons pour décrire les 4 interactions fondamentales :

- ❑ l'interaction forte (qui décrit les forces à l'intérieur du noyau)
- ❑ l'interaction faible (responsable de la radio-activité)
- ❑ l'interaction électromagnétique (qui décrit l'électricité et le magnétisme)
- ❑ la gravitation (qui décrit le mouvement des corps célestes et la chute des corps sur terre).

L'interaction forte entre quarks est véhiculée par les **gluons** (au nombre de 8), l'interaction électrofaible (qui unifie l'interaction électromagnétique et l'interaction faible) par le **photon** et **3 bosons intermédiaires**. Quant au toujours hypothétique **graviton**, il serait l'agent des forces de gravitation. Les trois premières interactions sont à la base du modèle standard de la physique des particules et de leurs interactions. Ce modèle a été développé dans les années 1970 par, entre autres, Sheldon Glashow – Abdus Salam – Steven Weinberg (prix Nobel de Physique 1979) pour la partie interaction électrofaible et par David J. Gross – H. David Politzer – Frank Wilczek (prix Nobel de Physique 2004) pour la partie interaction forte.

Enfin le tableau ne serait pas complet si nous ne terminions pas avec une dernière particule ou champ, à savoir la particule de Higgs, ou **boson de Higgs**, introduite par Peter Higgs et bien d'autres physiciens. Cette particule, que l'on appelle aussi « the God particle », correspond à un champ que l'on peut qualifier de champ nourricier car il est responsable de l'origine de la masse des particules. Il s'agit là du chaînon manquant du modèle standard puisque cette particule prédite à la fin des années 1960 n'a toujours pas été observée (malgré les prémices d'une découverte au CERN en l'an 2000).

En résumé, on a le tableau 1 relatif au modèle standard.

Tableau 1 : modèle standard de la physique des particules et de leurs interactions.

- **particules de matière : 12 fermions**
les 6 quarks et 6 leptons
- **champs pour décrire les 4 interactions
fondamentales : 12 (+1) bosons
intermédiaires**
les 8 gluons
les 3 bosons intermédiaires Z^0 , W^- , W^+
le photon γ
(le graviton)
- **particule ou champ nourricier
("apporte" la masse aux particules)**
le boson de Higgs (the God particle)
- **les antiparticules associées aux
particules⁷**

⁷ À chaque particule dotée de certaines charges (la plus connue est la charge électrique) et de certains nombres quantiques est associée une autre particule, appelée antiparticule, dotée de charges et de nombres quantiques opposés. La particule et son antiparticule ont la même masse. La dualité particule – antiparticule traduit une invariance relativiste.

Pour être complet, il faudrait aller au-delà de ce modèle standard et parler de particules supersymétriques⁸ (avec leur cohorte de **sélectron**, **sneutrino**, **squark**, **gluino**, **wino**, **zino**, **photino**, **gravitino**, **neutralino** et **chargino**), de la matière noire avec ses wimps, et de l'énergie noire. Il faudrait aussi parler de grande unification, de supergravité, de la théorie des cordes et des membranes et de leur espace à 11 dimensions. Mais ceci est une autre histoire et pour finir sur une note poétique voici le début du poème de James Joyce d'où sont « extraits » les quarks.

FINNEGANS WAKE

roman de James Joyce

extrait du poème sur les quarks :

**Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.
...**

et sa traduction par P. Lavergne⁹ :

**Trois quarts à la pie pour Maître Marc !
Sûr que sa barque ne vaut pas grand-chose
Et que tout ce qu'il a se trouve être hors de saison.
...**

Crédits pour les illustrations : les figures 1, 2 et 3 sont des adaptations de figures et d'images tirées de documentations en provenance du CERN (Laboratoire européen pour la physique des particules – l'acronyme provient du nom initial : Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire).

⁸ À chaque particule est associée une autre particule, dite particule supersymétrique. La particule supersymétrique associée à un fermion (appelée sfermion) est un boson et la particule supersymétrique associée à un boson (appelée bosino) est un fermion. La particule et sa particule supersymétrique ont des masses différentes. La dualité particule – particule supersymétrique traduit une symétrie, appelée supersymétrie, entre bosons et fermions.

⁹ Voir Finnegans wake, roman de James Joyce traduit par Philippe Lavergne, éditions Gallimard, 1995 (1^{ère} édition 1982).